

# 卒 業 論 文

## 自動車運搬船における貨物積載プランニング の車両配置問題に対する構築型解法

101810106 黒須諒

名古屋大学情報学部  
自然情報学科数理情報系

2022年2月

# 自動車運搬船における貨物積載プランニングの 車両配置計画に対する構築型解法

101810106 黒須諒

## 概要

複数の港で自動車を積み、複数の港で自動車を降ろす自動車運搬船について考える。自動車運搬船に積む自動車の集合が与えられてから実際に自動車が船に積まれるまでに、席割とシミュレーションと呼ばれる二種類の作業が行われる。席割では、船の階層内を一定間隔の大きさに区切ったホールドと呼ばれるスペースの各々に、与えられた積載自動車リストの自動車を何台割り当てられるかを考える。シミュレーションでは席割でホールド毎に割り当てられた自動車を、自動車の向きや空きスペース、作業効率などを考慮して車一台一台の配置場所を決定する。車両配置図を出力することで、現場の作業員が配置図に従い、効率よく駐車作業を行うことができる。本研究では、シミュレーションの自動化をするために数理最適化の技術によってコンピュータで短時間かつ効率の良いシミュレーション結果を出力することを目標とする。

シミュレーションは長方形詰込み問題として定式化することが出来るが、人が自動車を運転して所定の位置まで移動するという事を考えなければいけない。そのため、各デッキのランプと呼ばれる入口から配置場所までの移動経路確保と、駐車に要する局所的スペースの確保が課題となる。

本研究では二段階の構築法を提案する。一段階目では、積み地、揚げ地が同じ車を1つのグループとし、グループの大まかな配置場所を決定する。グループに属する車の総面積を求め、面積を固定した、形状可変長方形詰込み問題として定式化する。各グループを積み港を優先して並べた配列と揚げ港を優先して並べた順列対を用意しシーケンスペアを用いた制約を追加することで、ランプから配置場所までの移動経路を確保することができる。この計算には、商用の整数計画ソルバー (Gurobi Optimizer) を使用し最適解を求める。

二段階目では、各グループ内の車を一段階目で決められた場所の中で一台ずつパッキングを行う。二段階目では、第一段階で決められた領域で詳細な車両配置場所を決定する。配置予定の車を、駐車に必要なスペースを加えたレクトリニア図形とすることで駐車時に必要な局所的スペースを確保する。構築型解法として配置可能な場所の中で出来るだけ左下に詰込む bottom-left 法を用いた実装をした。

以上の構築法により得られた配置図と実際に現場で使われている配置図とを比較し、解の評価を行う。

# 目次

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	問題定義	2
2.1	用語定義 . . . . .	2
2.2	入力情報 . . . . .	3
2.3	出力 . . . . .	3
第 3 章	定式化	4
3.1	記号の定義 . . . . .	4
3.2	長方形詰込み問題 . . . . .	4
3.3	soft-rectangle パッキング . . . . .	5
3.4	Sequence-pair . . . . .	5
3.5	no-fit polygon . . . . .	5
3.6	制約 . . . . .	5
第 4 章	提案手法	6
4.1	第一段階 . . . . .	6
4.1.1	第一段階に対する解法 . . . . .	6
4.2	第二段階 . . . . .	6
4.2.1	bottom-left 法 . . . . .	6
4.2.2	レクトリニア図形 . . . . .	7
第 5 章	計算実験	8
5.1	第一段階の求解結果 . . . . .	8
5.2	第二段階の求解結果 . . . . .	8
第 6 章	まとめと今後の研究計画	9
	参考文献	11

# 第1章 はじめに

複数の港で自動車を積み、複数の港で自動車を降ろす自動車運搬船について考える。一般的に自動車運搬船は、自動車を船の一定間隔で区切られたホールドと呼ばれるスペースにどの自動車を何台割り当てるかを決定する席割と呼ばれる工程を経て、その後席割で割り当てられた自動車に対して向きや場所を考慮して一台ずつ船内の領域に配置するシミュレーションと呼ばれる作業を行う。現状、自動車を輸送する会社はこの作業を人手で行なっていることが多く、席割作業に3時間、シミュレーション作業に4時間かかることから、これらの工程を自動化することが業務効率化に役立つと考えている。

本研究では、2つの工程のうちシミュレーションに対して、数理最適化の技術によってコンピュータで短時間かつ効率の良いシミュレーション結果を出力することを目標とする。

本研究で扱うシミュレーションの概要について述べる。席割の結果から、各階層の各ホールドにどの種類の車を何台詰め込むかという情報が与えられる。この情報をもとにシミュレーションを行う。

シミュレーションは、車を長方形に近似することで長方形詰込み問題として定式化できる。本研究では、二段階に分けた構築法を提案する。一段階目では、各ホールド内に詰め込む車を、積み地や揚げ地の情報をもとにグループ分けし、グループごとに大まかな配置場所を決める。二段階では、グループ内における車両一台一台の詳細な配置場所を決定する。

本稿では、第2章で問題に対する詳細な設定や、本研究で扱う自動車運輸航海における専門用語について定義する。第3章では、問題の定式化と定式化に必要な変数や定数の定義を行う。第4章では、提案手法の詳細な説明を行う。

## 第2章 問題定義

シミュレーション作業は各階層ごとに行う。各階は4つのホールドと呼ばれる一定の広さで区切られたスペースが存在し、各ホールドに詰込む車の数、大きさ、種類、積み地、揚げ地は決まっている。本稿では複数の種類のある階層の中で、単純な階層のデータを用いて行う。

### 2.1 用語定義

本研究で扱う船の航海等に関する専門用語の定義をする。

- 席割  
注文一つ一つを船のホールド割り当てる作業。
- シミュレーション  
席割で決まった自動車を一台ずつホールド内の領域に貼り付ける作業。
- プランナー  
席割やシミュレーションを考える作業者。
- オペレーター  
港で自動車をホールドまで運転して積み降ろしをする作業者。
- デッキ  
船の内部の階層。
- ホールド  
各デッキ内を一定間隔の領域で仕切られた空間。
- セグメント  
隣接するいくつかのホールドをまとめた空間。
- ランプ  
上下デッキに移動するために各デッキの特定ホールドについているスロープ。
- 注文  
乗用車 100 台を港 A から港 B へ輸送, トラック 30 台を港 C から港 D へ輸送というような積載自動車の情報とそれらの積み地と揚げ地に関する情報。
- 積み地  
注文における自動車を積む港。
- 揚げ地  
注文における自動車を降ろす港。

- RT (revenue ton)  
基準となる車一台の面積に対する各注文の車の面積の割合.
- ユニット数  
各注文に含まれる自動車の台数.

## 2.2 入力情報

本研究で扱う 2 種類の情報について述べる.

- 車情報  
車の数, 種類, 大きさ, 積み地, 揚げ地, 指定のホールド.  
本研究では実際のプランで使われているデータを利用した.
- 船体情報  
船体の大きさ, 各階のランプの位置, 船内の障害物の位置や大きさ.  
本研究では実際の図面データを元に手入力で行った.

入力情報のうち車体情報の例を表 2.1 に示し, 船内図を図 2.1 に示す.

表 2.1: 車体情報の例

番号	車種	積み地	揚げ地	数量	ホールド	横幅	高さ
1	Prius	A 港	E 港	100	1	200	500
2	Prius	A 港	E 港	100	2	200	500
3	Aqua	B 港	F 港	30	2	250	450
4	Carolla	C 港	G 港	60	3	180	480
5	Lexus	C 港	G 港	40	3	230	510
6	Lexus	D 港	H 港	100	4	230	420

図 2.1: 船内図の例 (仮)

## 2.3 出力

詰め込むことのできなかった車の台数と配置図を出力する.  
配置図の例を図 2.2 に示す.

図 2.2: 車両配置図の例 (仮)

## 第3章 定式化

この章では本研究における記号の定義や問題の定式化について説明する.

### 3.1 記号の定義

記号	記号の説明
$x_i$	長方形 $i$ の左下の $x$ 座標
$y_i$	長方形 $i$ の左下の $y$ 座標
$w_i$	長方形 $i$ の幅
$w_i^l$	長方形 $i$ の幅の下界
$w_i^u$	長方形 $i$ の幅の上界
$h_i$	長方形 $i$ の高さ
$h_i^l$	長方形 $i$ の高さの下界
$h_i^u$	長方形 $i$ の高さの上界
$W$	母材の横幅
$H$	母材の高さ
$S_i$	長方形 $i$ の面積
$I$	詰め込む長方形の集合

### 3.2 長方形詰め込み問題

長方形詰め込み問題とは, 母材の幅  $W$  と高さ  $H$ , 長方形集合  $I$  に対し, 幅  $w_i$ , 高さ  $h_i$  が入力として与えられ, 母材からはみ出ることなくまた, どの二つの長方形も互いに重なることがないように詰め込む問題である.

制約を定式化すると, 次のように書くことができる.

制約: 長方形  $i \in I$  は母材上に配置される.

$$0 \leq x_i \leq W - w_i (i \in I) \quad (3.1)$$

$$0 \leq y_i \leq H - h_i (i \in I) \quad (3.2)$$

図 3.1:  $\text{NFP}(P, Q)$

制約: 長方形  $i, j \in I$  は互いに重ならない.

この制約条件は, 次の 4 つの不等式のうち一つ以上が成立しなければいけない.

$$x_i + w_i \leq x_j \quad (3.3)$$

$$x_j + w_j \leq x_i \quad (3.4)$$

$$y_i + h_i \leq y_j \quad (3.5)$$

$$y_j + h_j \leq y_i \quad (3.6)$$

### 3.3 soft-rectangle パッキング

長方形詰込み問題の一種で, 詰め込む長方形として幅と高さを変数とした soft-rectangle (可変形状長方形) を扱う.

通常, 面積に関する次のような等式制約または不等式制約が存在する.

$$w_i * h_i = S_i \quad (3.7)$$

$$w_i * h_i \geq S_i \quad (3.8)$$

$$(3.9)$$

また, 幅と高さの上界, 下界に関する以下の制約も存在する.

$$w_i^l \leq w_i \leq w_i^u \quad (3.10)$$

$$h_i^l \leq h_i \leq h_i^u \quad (3.11)$$

### 3.4 Sequence-pair

Sequence-pair とは, 二つの順列による長方形配置表現である. 長方形同士の相対位置関係を長方形名の順列対により表すことができる. Sequence-pair はどのような配置表現でも一意の順列対に表現でき, 逆に任意の順列対から一意に配置表現を求めることができる.

### 3.5 no-fit polygon

no-fit-polygon (NFP) とは, 平面上で多角形の重なりを判定する方法である. 多角形  $P$  と  $Q$  が与えられ,  $Q$  の配置が固定されているとする. この時,  $Q$  と重なりを持つ領域を  $\text{NFP}(P, Q)$  と書き, 図 3.5 に示す. 図 3.5 の太線が NFP の境界を表し, この NFP 内に  $P$  を配置すると  $Q$  と重なることを意味する. 母材内の既配置の長方形全てに対し, 長方形  $i$  の NFP を作成すると,  $i$  の配置可能領域はどの NFP の内部にも含まれない領域であるといえる.

### 3.6 制約

本研究で扱う独自の制約について説明する.



## 第4章 提案手法

本研究では2段階に分けた手法を提案する。1段階目では、同一セグメント内で、積み地、揚げ地が同じ車を一つのグループとし、デッキ内のグループの配置場所を決定する。2段階目では、各グループ内で一台ずつの詳細な配置場所を決定する。

### 4.1 第一段階

同一セグメントで、積み地揚げ地が同じ車を一つのグループとする。この際、グループ内の車の総面積を計算しておく。

#### 4.1.1 第一段階に対する解法

グループを積み地の昇順に並べた順列 $\theta+$ と、揚げ地の降順に並べた順列 $\theta-$ を用意する。 $\theta+$ において、積み地が同じグループが存在する場合、それらのグループ間で揚げ地の降順にする。 $\theta-$ において、揚げ地が同じグループが存在する場合、それらのグループ間で積み地の昇順にする。

二つの順列で順序が同じグループは、上下方向の制約を追加する。二つの順列で順序が異なるグループは、左右方向の制約を追加する。

以上に soft-rectangle パッキング問題の制約を加え、整数計画ソルバー (Gurobi Optimizer) を用いて計算を行った。与えられた問題例の全てで、1秒以内に最適解を求めることができた。

### 4.2 第二段階

第一段階で定められた領域内で、車一台ずつの詳細な配置場所を決定する。

#### 4.2.1 bottom-left 法

bottom-left 法 (BL 法) とは長方形詰込み問題に対するアルゴリズムの一つで、配置可能な領域の内、最も下に、同じ高さの候補があれば、最も左に配置する手法である。面積の大きい順にパッキングするといったように、順番を工夫することで有用な解が得られるとされている。

本研究では、解の構築に bottom-left 法を応用した手法を用いた。デッキの入口から見て下の部分では、bottom-left 法をそのまま利用した。デッキの入口から見て上の部分では、配置可能な場所のうち出来るだけ上、同じ高さなら左といった top-left 法を採用した。

#### 4.2.2 レクトリニア図形

レクトリニア図形とは、縦の線分と横の線分で囲まれた図形である。レクトリニア図形は長方形の和集合として表される。

本研究ではパッキング時に、駐車に必要なスペースを加えたレクトリニア図形と見なし、パッキング後は元の大きさの長方形とすることで一台一台の駐車位置を確保した。

## 第5章 計算実験

実験に用いるプログラムは Python を用いて実装し, 計算機は MacBookAir(CPU: Apple M1 chip, メモリ: 8GB) を用いて行った. 整数計画ソルバーとして, Gurobi Optimizer (ver9.5) を使用した.

### 5.1 第一段階の求解結果

整数計画ソルバー (Gurobi Optimizer) を用いて計算した結果, 全ての問題例で最適解が得られた. 出力の例を以下の図に示す. 長方形内の番号はグループの番号を表す.

### 5.2 第二段階の求解結果

出力される配置図と詰め込むことのできなかった車の台数の例をそれぞれ以下の図に示す.

## 第6章 まとめと今後の研究計画

自動車運搬船への貨物積み付け計画における, 車両配置計画に対して2段階の構築法を提案した. 2段階にすることで, 各車の積み地と揚げ地における導線確保と駐車時の局所的スペース確保を実現した. 1段階目では, シーケンスペアと soft-rectangle パッキング問題に帰着することで求解することができた. 2段階目では, レクトリニア図形とパッキング問題に有用な bottom-left 法を用いて構築した.

## 謝辞

本研究の遂行にあたり、熱心な指導と助言を頂きました柳浦睦憲教授に深く感謝の意を表します。提案手法の検討やその有用性において活発に議論を頂きました、胡艶楠氏、竹田陽氏には大変お世話になりました。深くお礼申し上げます。日々の研究室生活においては柳浦研究室の皆様にお世話になりました。皆様のおかげで有意義な研究活動に勤しむことができました。深くお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] M.R. Garey and D.S. Johnson, *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, Freeman, New York, 1979.
- [2] S. Imahori, M. Yagiura and T. Ibaraki, Variable neighborhood search for the rectangle packing problem, *Proceedings of the 6th Metaheuristics International Conference (MIC)*, Vienna, Austria, August 22–26, 2005, pp. 532–537.
- [3] D.S. Johnson and L.A. McGeoch, The traveling salesman problem: a case study, in: E.H.L. Aarts and J.K. Lenstra (eds.), *Local Search in Combinatorial Optimization*, John Wiley & Sons, Chichester, 1997, pp. 215–310.
- [4] 真野洋平, 橋本英樹, 柳浦睦憲, 学生実験のスケジューリングシステムの構築, オペレーションズ・リサーチ, 58 (2013) 524–532.
- [5] M. Yagiura, T. Ibaraki and F. Glover, An ejection chain approach for the generalized assignment problem, *INFORMS Journal on Computing*, 16 (2004) 133–151.